
第 2 章 半导体三极管放大电路

学前导读

放大电路能将微弱的电信号（电压、电流或功率）进行放大，因此广泛应用在各种电子设备中，是模拟电路的主要电路形式。单管放大电路是各类复杂电路的基本组成电路之一。本章主要以单管共射极放大电路为例，讨论放大电路的组成、工作原理及静态工作点和性能指标的计算。对于电压放大电路来说，主要的技术指标有电压增益、输入阻抗、输出阻抗和频响带宽等。在分析单管放大电路性能指标的基础上，讨论了多级放大电路的放大倍数、频率响应等问题。

2.1 基本共射极放大电路

从表面上看放大是将电信号由小变大，实质上，放大的过程是一个能量控制和转换的过程。

2.1.1 三极管在放大电路中的三种连接方式

三极管有三个电极，它在组成放大电路时便有三种连接方式，即放大电路的三种组态：共发射极、共集电极和共基极组态放大电路。

图 2.1 所示为三极管在放大电路中的三种连接方式。图 2.1 (a) 从基极输入信号，从集电极输出信号，发射极作为输入信号和输出信号的公共端，此即共发射极（简称共射极）放大电路；图 2.1 (b) 从基极输入信号，从发射极输出信号，集电极作为输入信号和输出信号

的公共端，此即共集电极放大电路；图 2.1 (c) 从发射极输入信号，从集电极输出信号，基极作为输入信号和输出信号的公共端，此即共基极放大电路。

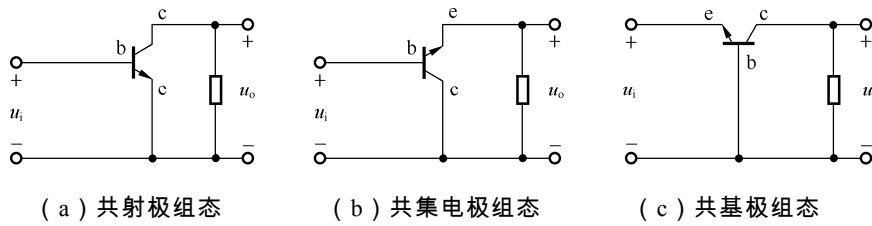


图 2.1 三极管的三种连接方式

2.1.2 基本放大电路的组成和工作原理

1. 共射极放大电路

在三种组态放大电路中，共发射极电路用得最为普遍。下面就以 NPN 共射极放大电路为例，讨论放大电路的组成、工作原理以及分析方法。

图 2.2 所示为 NPN 型共射极放大电路的原理性电路。

电路中各元件的作用如下：

- (1) 三极管：放大电流作用。
- (2) 隔直耦合电容 C_1 和 C_2 ：隔断直流，通交流。
- (3) 基极回路电源 U_{BB} 和基极偏置电阻 R_b ：为电路提供合适的静态偏置。
- (4) 集电极电源 U_{CC} ：为电路提供合适的静态偏置。
- (5) 集电极负载电阻 R_c ：将放大的电流转换为放大的电压。

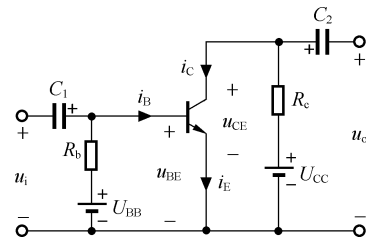


图 2.2 基本共射极放大电路

电流的方向：对 NPN 型三极管，基极电流 i_B 、集电极电流 i_C 流入电极为正，发射极电流 i_E 流出电极为正，这和 NPN 型三极管的实际电流方向相一致。

2. 电压、电流等符号的规定

放大电路中（如图 2.3 所示）既有直流电源 U_{CC} ，又有交流电压 u_i ，电路中三极管各电极的电压和电流包含直流量和交流量两部分。为了分析的方便，各量的符号规定如下：

- (1) 直流分量：用大写字母和大写下标表示。
- (2) 交流分量：用小写字母和小写下标表示。
- (3) 瞬时值：用小写字母和大写下标表示。
- (4) 交流有效值：用大写字母表示。
- (5) 交流峰值：用大写字母和小写下标表示。

3. 放大电路实现信号放大的实质

如图 2.4 所示，放大器放大的实质是实现小能量对大能量的控制和转换作用。根据能量守恒定律，在这种能量的控制和转换中，电源 U_{CC} 为输出信号提供能量。

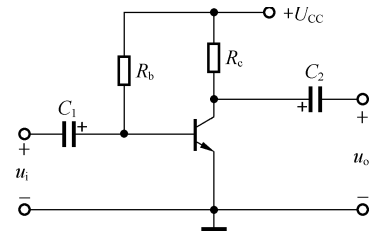


图 2.3 单电源共射极电路

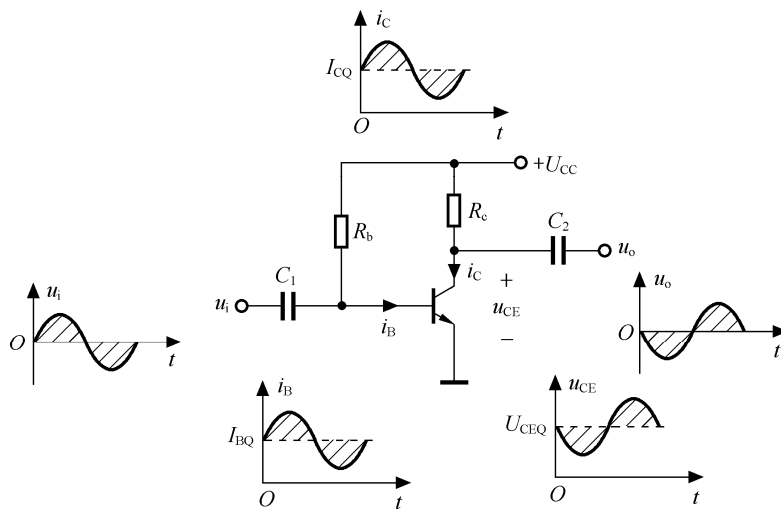


图 2.4 放大电路实现信号放大的工作过程

需要特别注意的是，信号的放大仅对交流量而言。

4. 基本放大电路的组成原则

三极管具有三个工作状态，分别为截止、放大和饱和状态。在放大电路中为实现其放大作用，三极管必须工作在放大状态。从上面放大电路的工作过程可概括放大电路的组成原则为：

(1) 外加电源的极性必须保证三极管的发射结正偏、集电结反偏。

(2) 输入电压 u_i 要能引起三极管的基极电流 i_B 作相应的变化。

(3) 三极管集电极电流 i_C 的变化要尽可能的转为电压的变化输出。

(4) 放大电路工作时，直流电源 U_{CC} 要为三极管提供合适的静态工作电流 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和电压 U_{CEQ} ，即电路要有一个合适的静态工作点 Q 。

2.2 基本放大电路的分析方法

2.2.1 放大电路的图解分析法

图解分析方法是指根据输入信号，在三极管的特性曲线上直接作图求解的方法。

1. 静态工作情况分析

1) 静态、动态和静态工作点

① 静态：输入交流信号为零的情况。

② 动态：在静态工作点的基础上讨论放大信号的原理。

③ 静态工作点 Q ：静态时，三极管各电极的电压、电流均为直流量，分别用 I_B 、 I_C 、 U_{BE} 、 U_{CE} 表示。由于这组数据分别与三极管的输入输出特性曲线的固定点“ Q ”的坐标值相对应，故这组数据值为静态工作点，分别用 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 表示，如图 2.5 所示。

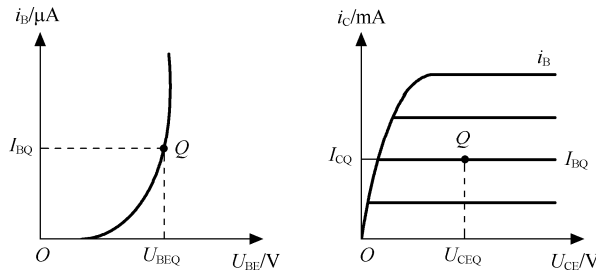


图 2.5 静态工作点 Q

2) 直流通路

直流通路是指静态 ($u_i = 0$) 时, 电路中只有直流分量流过的通路。

画直流通路有两个要点: ① 电容视为开路; ② 电感视为短路。

图 2.6 和 2.7 所示分别为共射极放大电路及其直流通路。估算电路的静态工作点 Q 时必须依据直流通路。

须依据直流通路。

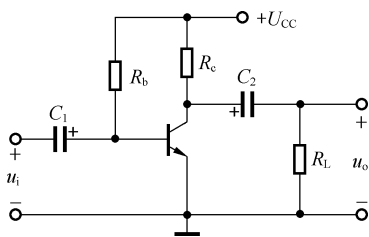


图 2.6 共射极放大电路

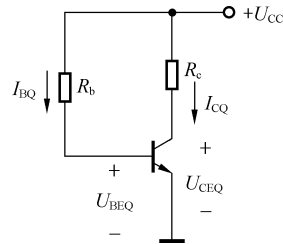


图 2.7 共射电路的直流通路

3) Q 点的估算

根据直流通路, 估算 Q 点有两种方法: ① 公式估算法确定 Q 点; ② 图解法确定 Q 点。

如图 2.8 所示, 此直线由直流通路获得, 称为直流负载线。

由方程 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$, 令 $U_{CE} = 0$, $I_C = U_{CC} / R_C$; $I_C = 0$ 、 $U_{CE} = U_{CC}$; 可画出直流负载线。

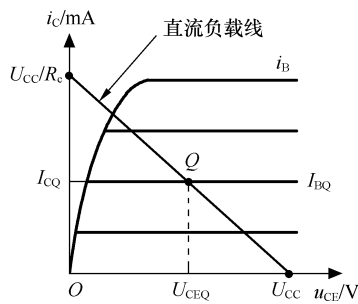


图 2.8 图解法确定 Q 点

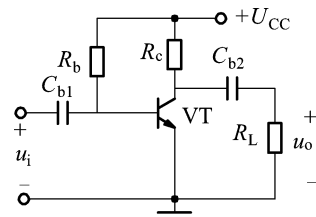


图 2.9 例 2.1 共射极放大电路

例 2.1 如图 2.9 所示，已知 $U_{CC} = 12\text{ V}$ ， $R_c = 4\text{ k}\Omega$ ， $R_b = 300\text{ k}\Omega$ ， $\beta = 37.5$ 。用估算法计算静态工作点。

解 $I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_b} = \frac{12\text{ V}}{300\text{ k}\Omega} = 0.04\text{ mA} = 40\text{ }\mu\text{A}$

$$I_C \approx \beta I_B = 37.5 \times 0.04\text{ mA} = 1.5\text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c = 12 - 1.5 \times 4 = 6\text{ V}$$

2. 动态工作情况分析

1) 交流通路

交流通路是指动态 ($u_i \neq 0$) 时，电路中交流分量流过的通路。

画交流通路时有两个要点：① 耦合电容视为短路；

② 直流电压源（内阻很小，忽略不计）视为短路。

图 2.10 为图 2.6 所示共射极放大电路的交流通路。

计算动态参数 A_u 、 R_i 、 R_o 时必须依据交流通路。

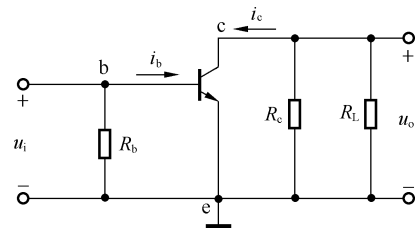


图 2.10 共射极电路的交流通路

2) 交流负载线

在图 2.10 中有关系式

$$u_o = \Delta u_{CE} = -\Delta i_c (R_c // R_L) = -i_c \times R'_L$$

其中， $R'_L = R_c // R_L$ 称为交流负载电阻，负号表示电

流 i_c 和电压 u_o 的方向相反。

交流变化量在变化过程中一定要经过零点，此时

$u_i = 0$ ，与静点 Q 相符合。所以 Q 点也是动态过程中的一个点。

交流负载线和直流负载线在 Q 点相交，如图 2.11

所示。

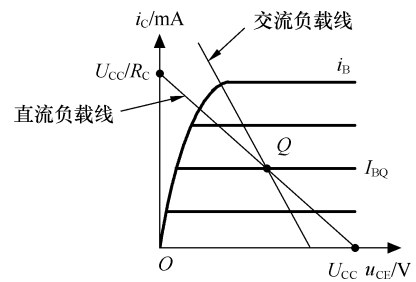


图 2.11 交流负载线

交流负载线由交流通路获得且过 Q 点，因此交流负载线是动态工作点移动的轨迹。

3) 放大电路的动态工作范围

图 2.12 所示为共射极电路的动态工作情况。

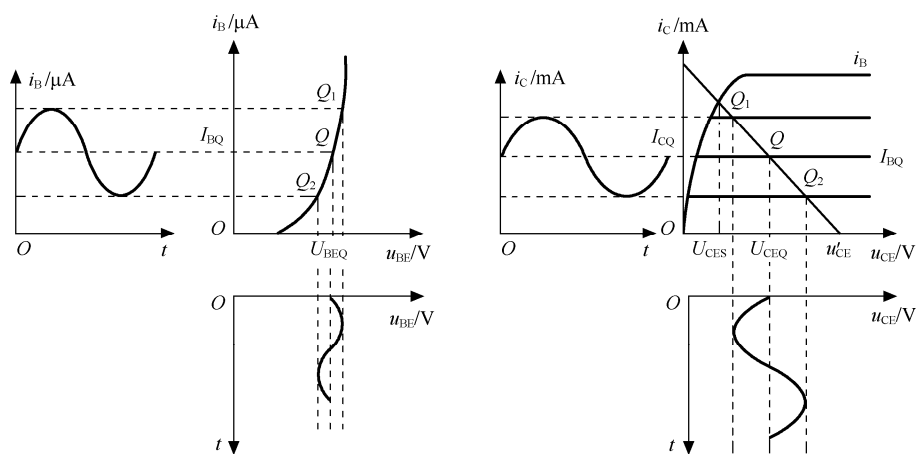


图 2.12 共射极及电路的动态工作情况

注意：三极管各电极的电压和电流瞬时值是在静态值的基础上叠加了交流分量，但瞬时值的极性和方向始终固定不变。

4) 非线性失真

所谓失真，是指输出信号的波形与输入信号的波形不一致。三极管是一个非线性器件，有截止区、放大区、饱和区三个工作区，如果信号在放大的过程中，放大器的工作范围超出了特性曲线的线性放大区域，就进入了截止区或饱和区，集电极电流 i_c 与基极电流 i_b 不再呈线性比例关系，则会导致输出信号出现非线性失真。

非线性失真分为截止失真和饱和失真两种。

(1) 截止失真。

当放大电路的静态工作点 Q 选取比较低时， I_{BQ} 较小，输入信号的负半周进入截止区而造成的失真称为截止失真。图 2.13 所示为放大电路的截止失真。

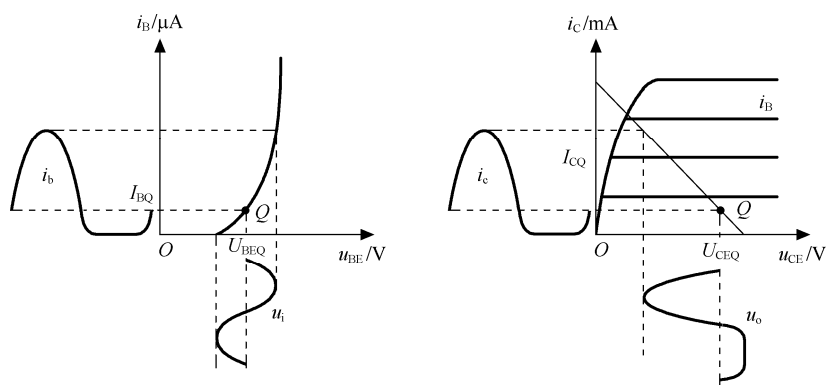


图 2.13 截止失真

(2) 饱和失真。

当放大电路的静态工作点 Q 选取比较高时， I_{BQ} 较大， U_{CEQ} 较小，输入信号的正半周进入饱和区而造成的失真称为饱和失真。图 2.14 所示为放大电路的饱和失真。饱和失真时， u_i 正半周进入饱和区造成 i_c 失真，从而使 u_o 失真。

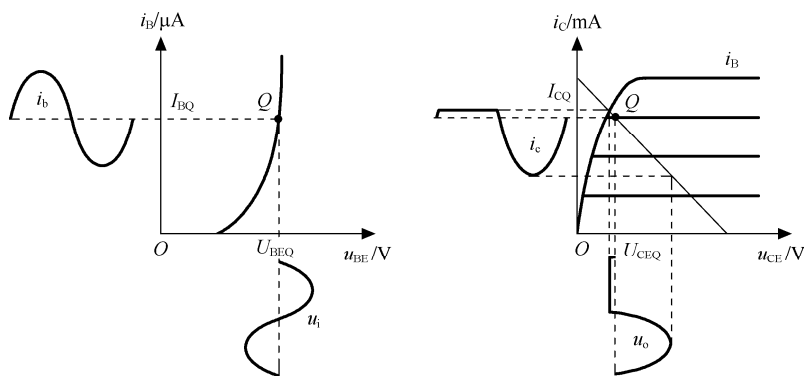


图 2.14 饱和失真

2.2.2 放大电路的主要性能指标

1. 放大倍数 A_u 、 A_i

放大倍数是衡量放大电路对信号放大能力的主要技术参数。

(1) 电压放大倍数 A_u ：放大电路输出电压与输入电压的比值，即

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} \quad (2.1)$$

(2) 源电压放大倍数 A_{us} : 输出电压与信号源电压之比, 即

$$A_{us} = \frac{u_o}{u_s} \quad (2.2)$$

(3) 电流放大倍数 A_i : 放大电路输出电流与输入电流的比值, 即

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad (2.3)$$

实际应用中, 放大倍数常用分贝来表示。

$$\text{电压增益} = 20\lg|A_u| \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

$$\text{电流增益} = 20\lg|A_i| \text{ (dB)} \quad (2.5)$$

2. 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

对于一定的信号源电路, 输入电阻 R_i 越大, 放大电路从信号源得到的输入电压 u_i 就越大, 放大电路向信号源索取电流的能力则越小。

当放大电路作为一个电压放大器来使用时, 其输出电阻 R_o 的大小决定了放大电路的带负载能力。 R_o 越小, 放大电路的带负载能力越强, 即放大电路的输出电压 u_o 受负载的影响越小。

图 2.15 和图 2.16 所示分别为求解放大电路输入、输出电阻的等效电路。

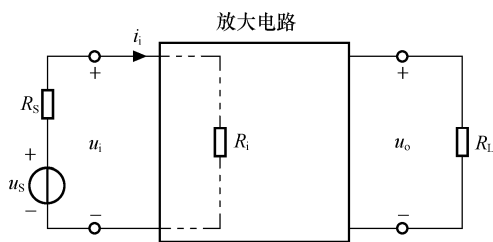


图 2.15 放大电路输入电阻的等效电路

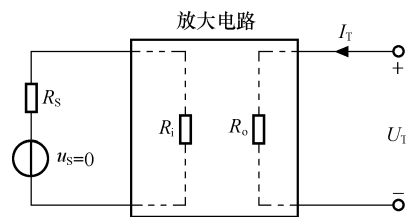


图 2.16 放大电路输出电阻的等效电路

2.2.3 放大电路的微变等效电路分析法

微变等效电路分析法指的是在三极管特性曲线上 Q 点附近,当输入为微变信号(小信号)时,可以把三极管的非线性特性近似看成是线性的,即把非线性器件三极管转为线性器件进行求解的方法。

1. 三极管的微变等效电路分析法

1) 三极管的微变等效电路

要得到三极管的微变等效电路,必须先求得三极管的交流输入电阻 r_{be} 和三极管的电流放大倍数。

由图 2.17 可知,三极管的交流输入电阻为

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}$$

由图 2.18 可知,三极管的电流放大倍数为

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

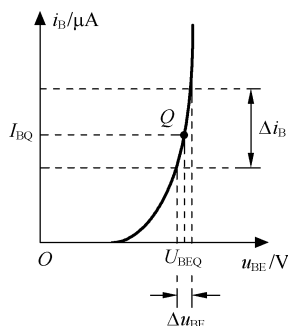


图 2.17 三极管的交流输入电阻 r_{be}

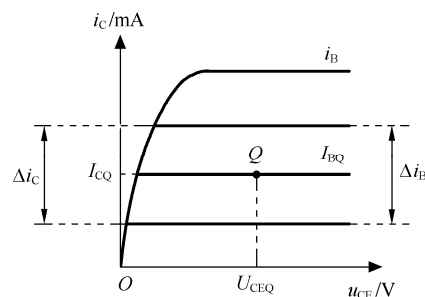


图 2.18 三极管的电流放大系数 β

当输入为微变信号时,对于交流微变信号,三极管可用如图 2.19 (b) 所示的微变等效电路来代替。图 2.19 (a) 所示的三极管是一个非线性器件,但图 2.19 (b) 所示的是一个线性电路。这样就把三极管的非线性问题转化为线性问题。

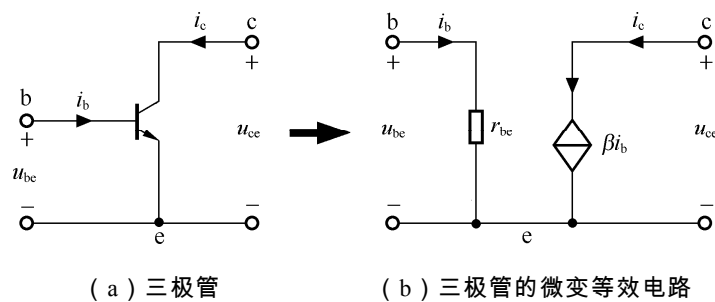


图 2.19 三极管的微变等效电路模型

2) 交流输入电阻 r_{be}

$r_{be} = r'_{bb} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$, 对于低频小功率管来说, r'_{bb} 为 $100 \sim 500 \Omega$, 一般可取 $r'_{bb} = 300 \Omega$, I_{EQ}

为静态发射极电流。

3) 有关微变等效电路的几点说明

微变等效电路只适用于小信号放大电路, 主要用于对放大电路的动态性能的分析。具体

方法: 先画出放大电路的交流通路, 然后用三极管的微变等效电路代替三极管, 并标明电压、电流的参考方向。

2. 用微变等效电路分析法分析共射放大电路

用微变等效电路分析法分析放大电路的求解步骤如下:

- ① 用公式估算法估算 Q 点值, 并计算 Q 点处的参数 r_{be} 值。
- ② 由放大电路的交流通路, 画出放大电路的微变等效电路。
- ③ 根据等效电路直接列方程, 求解 A_u 、 R_i 、 R_o 。

注意: NPN 和 PNP 型三极管的微变等效电路一样。

1) 共射放大电路的微变等效电路

对于图 2.6 所示的共射极放大电路, 从其交流通路图 2.10 可得电路的微变等效电路如图

2.20 所示。 u_s 为外接的信号源， R_s 是信号源内阻。

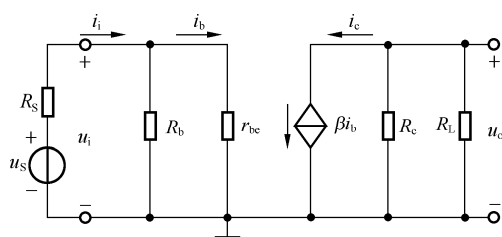


图 2.20 共射放大电路的微变等效电路

2) 求解电压放大倍数 A_u

$$u_o = -i_c R'_L = -\beta i_b R'_L \quad (2.6)$$

$$u_i = i_b r_{be} \quad (2.7)$$

$$A_u = -\frac{\beta i_b R'_L}{i_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (2.8)$$

其中，负号表示输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的相位相反。

3) 求解电路的输入电阻 R_i

$$R_i = R_b // r_{be} \quad (2.9)$$

一般基极偏置电阻 $R_b \gg r_{be}$ ，所以 $R_i \approx r_{be}$ 。

4) 求解电路的输出电阻 R_o

图 2.21 所示为求解输出电阻的等效电路。

$$R_o \approx R_c \quad (2.10)$$

输出电阻 R_o 越小，放大电路的带负载能力越强。输出电阻 R_o 中不应包含负载电阻 R_L 。

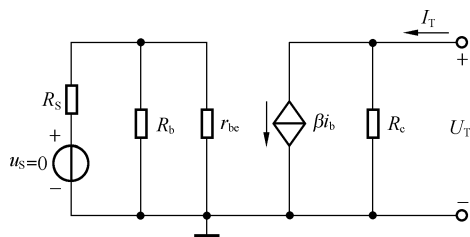


图 2.21 求解输出电阻的等效电路

6) 求解输出电压 u_o 对信号源电压 u_s 的放大倍数 A_{us}

$$A_{us} = \frac{u_o}{u_s} = \frac{u_i}{u_s} \cdot \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_i}{u_s} A_u \quad (2.11)$$

$$\frac{u_i}{u_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \approx \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \quad (2.12)$$

$$A_{us} \approx -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}} \quad (2.13)$$

由于信号源内阻的存在， $A_{us} < A_u$ ，电路的输入电阻越大，输入电压 u_i 越接近 u_s 。

例 2.2 共射放大电路如图 2.22 (a) 所示。设： $U_{CC} = 12\text{ V}$ ， $R_b = 300\text{ k}\Omega$ ， $R_c = 3\text{ k}\Omega$ ，

$R_L = 3\text{ k}\Omega$ ，BJT 的 $\beta = 50$ 。

(1) 试求电路的静态工作点 Q 。

(2) 估算电路的电压放大倍数、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

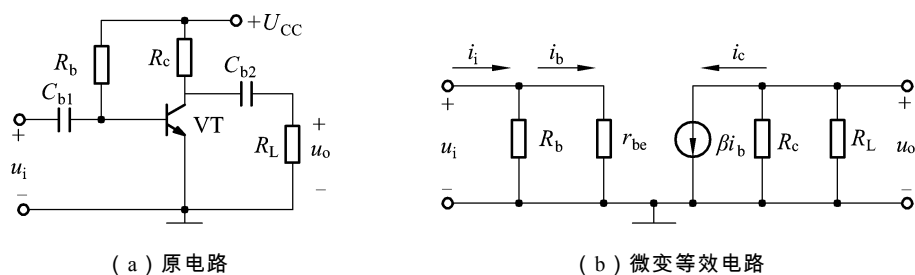


图 2.22 例 2.2 电路图

解 (1) $I_{BQ} \approx \frac{U_{CC}}{R_b} = \frac{12\text{ V}}{300\text{ k}\Omega} = 40\text{ }\mu\text{A}$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 40\text{ }\mu\text{A} = 2\text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_c = 12\text{ V} - 2\text{ mA} \times 3\text{ k}\Omega = 6\text{ V}$$

(2) 确定图 2.22 (b) 所示微变等效电路参数。

$$r_{be} = 200\text{ }\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{ mV}}{I_E(\text{mA})} = 200\text{ }\Omega + 51 \times \frac{26\text{ mV}}{2\text{ mA}} = 863\text{ }\Omega$$

$$A_u = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} = \frac{-50 \times 3\text{ k}\Omega // 3\text{ k}\Omega}{0.863\text{ k}\Omega} = -86.9$$

$$R_i = r_{be} // R_b \approx r_{be} = 863 \Omega$$

$$R_o = R_c = 3 \text{ k}\Omega$$

3. 两种分析方法的特点比较

放大电路的图解分析法：其优点是形象直观，适用于 Q 点分析、非线性失真分析、最大不失真输出幅度的分析，能够用于大、小信号；其缺点是作图麻烦，只能分析简单电路，求解误差大，不易求解输入电阻、输出电阻等动态参数。

微变等效电路分析法：其优点是适用于任何复杂的电路，可方便求解动态参数如放大倍数、输入电阻、输出电阻等；其缺点是只能用于分析小信号，不能用来求解静态工作点 Q 。

实际应用中，常把两种分析方法结合起来使用。

2.3 放大电路的偏置电路

2.3.1 温度变化对 Q 点的影响

Q 点的影响因素有很多，如电源波动、偏置电阻的变化、管子的更换、元件的老化等，不过最主要的影响还是环境温度的变化。三极管是一个对温度非常敏感的器件，随温度的变化，三极管参数会受到影响，具体表现在以下几个方面。

(1) 温度升高，三极管的反向电流增大。

(2) 温度升高，三极管的电流放大系数 β 增大。

(3) 温度升高，相同基极电流 I_B 下， U_{BE} 减小，三极管的输入特性具有负的温度特性。

温度每升高 1°C ， U_{BE} 大约减小 2.2 mV 。

2.3.2 工作点稳定电路的组成及稳定 Q 点的原理

1. 工作点稳定电路的组成

工作点稳定电路如图 2.23 所示。

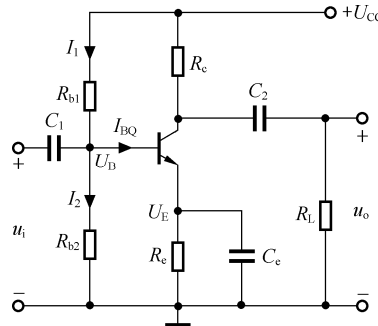


图 2.23 分压偏置式的工作点稳定电路

2. 稳定 Q 点的原理

分压偏置式放大电路具有稳定 Q 点的作用，在实际电路中应用广泛。实际应用中，为保

证 Q 点的稳定，要求电路：

$$I_1 \gg I_{BQ}$$

一般对于硅材料的三极管有：

$$I_1 = (5 \sim 10) I_{BQ}$$

$$U_{BQ} = (5 \sim 10) U_{BEQ}$$

稳定过程：静态工作点的稳定过程可以简单地表示为

$$T \uparrow \text{ 或 } \beta \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} \uparrow \rightarrow (U_{BQ} \text{ 基本恒定}) U_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

2.3.3 工作点稳定电路的分析